

Projeto de Hidrociclones Usando Otimização Robusta e Análise do Efeito da Robustez

Vitor Alves Garcia*, Fran Sérgio Lobato, Luiz Gustavo Martins Vieira

*Laboratório de Separação e Energias Renováveis (FEQUI-UFU), v.alvesgarcia@gmail.com

Palavras-chave

hidrociclone, otimização multi-objetivo, robustez, evolução diferencial

1. INTRODUÇÃO

Os hidrociclones são equipamentos largamente aplicados na indústria para promover a separação de uma fase discreta, que pode ser sólida ou líquida, de uma fase contínua, líquida. Estes separadores são constituídos por uma seção cilíndrica, onde ocorre a alimentação da suspensão de forma tangencial, e uma seção cônica. O processo de separação nestes equipamentos ocorre devido a ação de uma força centrífuga, decorrente do movimento rotacional descrito pela suspensão dentro do equipamento, e da diferença de densidade entre as fases. A força centrífuga faz com que as partículas maiores e mais densas da fase discreta sejam separadas da fase contínua e saiam pela saída inferior do separador, denominada de *underflow*, enquanto que as partículas menores e menos densas saem junto com a maior parte da fase contínua pela saída de *overflow*, na parte superior do equipamento (Svarovsky, 1984).

Tradicionalmente, o desempenho das operações de hidrociclonagem é determinado pelo poder de separação, de concentração e consumo energético do equipamento. O poder de separação tem uma relação direta com a eficiência total (E_T), o poder de concentração está inversamente relacionado com a razão de líquido (R_L) e o consumo energético apresenta uma relação direta com o número de Euler (Eu). Estes três medidores de desempenho são altamente dependentes das dimensões geométricas do hidrociclone, tais como os diâmetros da seção cilíndrica (D_c), do duto de alimentação (D_i), do tubo de *overflow* (D_o) e do orifício de *underflow* (D_u), os comprimentos total (L) e do tubo de *overflow* (λ), e do ângulo da seção cônica (θ) que está associado ao comprimento desta parte do separador (H). Dessa forma, a busca pelos melhores valores de E_T , R_L e Eu em função das variáveis geométricas de um hidrociclone configura um problema de otimização multi-objetivo.

Normalmente, nos problemas de otimização não são levados em consideração os desvios e incertezas em torno das variáveis e parâmetros das funções objetivo. Isto possibilita a obtenção de resultados que se distanciam consideravelmente das constatações experimentais, e que dificultam a implementação da melhoria obtida na prática. No caso dos hidrociclones, estas incertezas em torno das variáveis de projeto podem decorrer de imprecisões no processo de fabricação do equipamento ou mesmo do desgaste das partes do separador por abrasão durante a operação de separação. Sendo assim, faz-se necessário a utilização de uma técnica de inserção das informações de incertezas das variáveis no processo de otimização, para que se ganhe confiabilidade nos resultados obtidos. Em outras palavras, é necessário que uma metodologia robusta seja aplicada ao problema de otimização, tal como o método da Média Efetiva (DEB; GUPTA, 2006).

Dessa forma, o objetivo do presente trabalho consiste em projetar hidrociclones com altos poderes de concentração e separação e baixo consumo energético usando otimização multi-objetivo robusta.

2. METODOLOGIA

O presente trabalho é dividido em duas etapas. A primeira delas consiste na geração de modelos empíricos que representam o comportamento da eficiência total, da razão de líquido e do número de Euler em função das variáveis geométricas do hidrociclone. A segunda etapa consiste na otimização robusta das variáveis geométricas do separador de forma a obter-se equipamentos com altas eficiências e baixas razões de líquido e número de Euler simultaneamente.

2.1. Ajustes dos Modelos Empíricos

Para a geração dos modelos empíricos foram usados os resultados experimentais obtidos em um PCC feito por Salvador (2017). A partir dos dados experimentais, foram ajustados modelos das respostas de interesse do hidrociclone (E_T , R_L e Eu) em função das variáveis geométricas D_i , D_o , L e θ , codificadas respectivamente sob as formas de X_1 , X_2 , X_3 e X_4 . Os modelos ajustados são de segunda ordem e consideram as interações entre os pares de variáveis de projeto, conforme mostrado na Eq. 1.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n=4} \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{n=4} \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{n=4} \sum_{j>i}^{n=4} \beta_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

Na Eq. 1, Y corresponde a variável resposta, podendo ser E_T , R_L ou Eu , dependendo do caso analisado. X_i e X_j correspondem às variáveis geométricas do hidrociclone codificadas. Por fim, os termos β_0 , β_i , β_{ii} e β_{ij} correspondem aos parâmetros do modelo a serem ajustados.

Para realização do ajuste, foi feita uma otimização usando o método da evolução diferencial (STORN; PRICE, 1995), na qual tinha-se como objetivo a minimização da função f , mostrada na Eq. 2.

$$f = \sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} \frac{(Y_i^{\text{exp}} - Y_i^{\text{cal}})^2}{(Y_{\text{max}}^{\text{exp}})^2} \quad (2)$$

A função f corresponde ao somatório das diferenças quadráticas entre o valor experimental e o valor calculado pelo modelo da resposta de interesse, divididas pelo maior valor desta resposta entre os dados experimentais elevado ao quadrado.

Na minimização de f foi inserida robustez no processo de otimização através do método da Média Efetiva. Esta técnica se baseia na avaliação da função objetivo nos vizinhos dos pontos de interesse e não somente nos pontos em si. Dessa forma o valor atribuído a função objetivo de cada ponto corresponde a uma média dos valores avaliados nas vizinhanças do ponto. A Média Efetiva de uma função objetivo f_0 avaliada em um ponto a é dada pela Eq.3.

$$f_{0\text{eff}} = \frac{1}{|V_\delta(a)|} \int_{b \in V_\delta(a)} f(b) db \quad (3)$$

Na Eq. 3 o termo $V_\delta(a)$ corresponde à δ -vizinhança gerada em torno do ponto a e $|V_\delta(a)|$ é o hipervolume dessa vizinhança. O termo b corresponde a um ponto genérico dentro da vizinhança gerada de a cujo raio é δ .

Na otimização para ajuste dos modelos, foi considerado um valor do parâmetro de robustez δ de 10% e foram geradas 25 amostras nas vizinhanças dos pontos para avaliação da Média Efetiva da função objetivo de forma numérica. Além disso, o intervalo de busca considerado para os parâmetros do modelo foi de -2000 a 2000.

2.2. Otimização Robusta das Dimensões do Hidrociclone

Os modelos ajustados de E_T , R_L e Eu foram usados como as funções objetivo nas otimizações robustas das variáveis geométricas do hidrociclone (D_i , D_o , L e θ). Estas otimizações também foram realizadas pelo método da Evolução Diferencial e usando a Média Efetiva como técnica de inserção de robustez. As otimizações foram realizadas considerando quatro diferentes valores do parâmetro de robustez δ (0%, 5%, 10% e 25%), a fim de que o efeito de inserção de robustez sobre os resultados da otimização pudesse ser observado. Além disso, o número de amostras geradas nas vizinhanças dos pontos na avaliação da Média Efetiva era de 250 amostras.

Nas otimizações, foram consideradas três restrições para assegurar que os hidrociclones obtidos tivessem bons desempenhos nas três variáveis resposta analisadas ($70\% < E_T < 100\%$; $0 < R_L < 10\%$; $0 < Eu < 5000$) e uma restrição para assegurar a existência dos hidrociclones obtidos, que garantia que o comprimento total do hidrociclone era maior que o comprimento da parte cônica ($L > H$).

Foram considerados quatro casos a serem otimizados conforme mostrado na Tab. 1.

Tabela 1: Casos de otimização robusta estudados

Caso 1	Máximo E_T e mínimo R_L
Caso 2	Máximo E_T e mínimo Eu
Caso 3	Mínimo R_L e mínimo Eu

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1, são mostrados os espaços dos objetivos contendo as curvas de Pareto obtidas para cada caso estudado. Nos gráficos, é possível notar o comportamento conflitante entre os objetivos para os três casos, ou seja, a medida que se melhora um objetivo, simultaneamente piora-se o outro. Observa-se que no Caso 1, os hidrociclones obtidos apresentam razões de líquido que variam entre 5 e 10% e eficiências totais entre 76 e 86%. No Caso 2, o número de Euler dos hidrociclones encontra-se entre 500 e 5000 e suas eficiências estão entre 75 e 86%. Já para o Caso 3, O número de Euler varia entre 500 e 4000, enquanto que a razão de líquido dos hidrociclones está entre 5 e 10%. Sendo assim, em todos os três casos estudados, os hidrociclones obtidos apresentam desempenho dentro do desejado, podendo ser considerados equipamentos de alto poder de separação e de concentração e de baixo consumo energético.

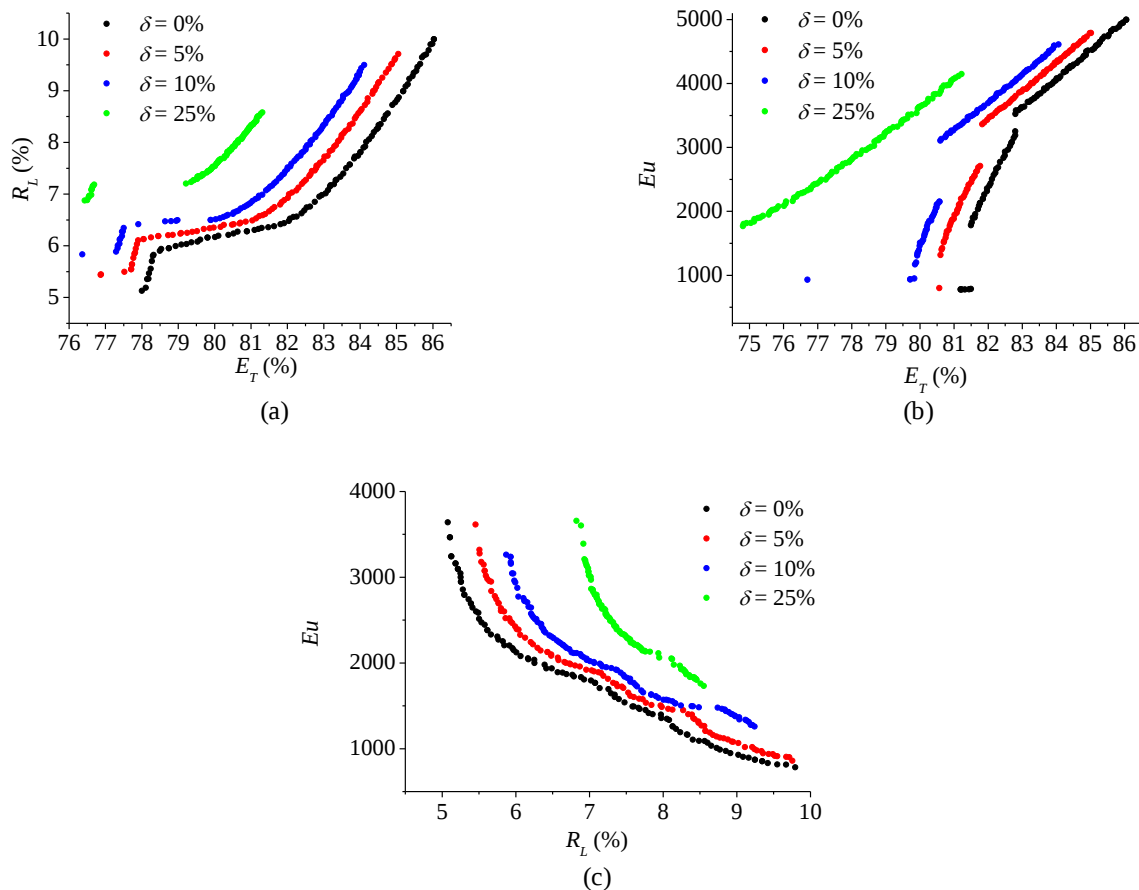


Figura 1: Curvas de Pareto dos hidrociclones obtidos para o Caso 1 (a), Caso 2 (b) e Caso 3 (c).

Além disso, é possível perceber que a inserção de robustez no problema de otimização gera um afastamento cada vez maior da curva de Pareto em relação à curva nominal ($\delta = 0\%$). Ademais, a medida que o parâmetro de robustez aumenta, existe uma tendência em reduzir-se o tamanho das curvas de Pareto, ou seja, os pontos ótimos obtidos tendem a se concentrar em regiões cada vez menores do espaço dos objetivos. Na prática, isto implica em uma variedade menor de hidrociclones de alto desempenho obtidos, sendo este o custo do ganho de confiabilidade nos resultados provido pela inserção da robustez no problema.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pelo apoio financeiro.

5. REFERÊNCIAS

- Deb, K.; Gupta, H. "Introducing robustness in multi-objective optimization". *Evolutionary Computation*, Vol.14, 2006, pp. 463-494.
- Salvador, F. F. "Otimização geométrica de hidrociclones com cilindros e cones permeáveis". Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.
- Storn, R.; Price, K. "Differential Evolution – A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces". *International Computer Science Institute*, Vol. 12, 1995, pp. 1-16.
- Svarovsky, L. "Hydrocyclones". Eastbourne, UK: Holt, Rinehart & Winston, 1984.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.